

CINETIQUE D'HUMIFICATION ET DE MINERALISATION DE MELANGES SOLS-RESIDUS VEGETAUX

M. PANSU⁽¹⁾, H. SIDI⁽²⁾

RESUME

Un ensemble de trois expériences d'incubation au laboratoire de mélanges de sols (vertisol et sols salé carbonaté) et de pailles de blé, a permis la mise en équation en fonction du temps les teneurs en carbone organique total et en carbone des matières légères séparées par densimétrie.

Le carbone organique évolue comme une somme de deux exponentielles (tableau III) dont les paramètres ont été comparés aux résultats d'autres expérimentations (tableau IV).

Le carbone des matières légères décroît selon une loi hyperbolique dans deux expériences et une loi exponentielle dans la troisième (tableau VI, fig. 3).

Deux modèles prévisionnels sont proposés pour décrire l'humification et la minéralisation du carbone des sols et des résidus végétaux sous l'action des micro-organismes (fig. 1).

— Un modèle à deux compartiments prenant mieux en compte que celui de HENIN et al. (1959) les processus de renouvellement.

— Un modèle plus précis à trois compartiments permettant de distinguer dans les fractions labiles, le carbone resté à l'état végétal et celui provenant à la fois de la croissance microbienne et des métabolites végétaux de faible durée de vie.

Les modèles proposés ont été validés par nos expériences de laboratoire (tableau V, fig. 2, fig. 4).

MOTS CLES : Modélisation - Matières organiques des sols - Carbone des sols - Cinétique de minéralisation - Cinétique d'humification.

KEY WORDS : Modelisation - Soil organic mater - Soil carbon - Mineralization kinetics - Humification kinetics.

INTRODUCTION

L'évolution organique de mélanges de sols et le paille de blé a été étudiée sous un régime hydrique alterné sans lessivage. Cette expérience de laboratoire (H. SIDI, 1987) visait à préciser l'influence de l'apport de résidus végétaux sur la structure de deux sols méditerranéens de la région de Mateur (Tunisie) : un sol vertique et un sol salé carbonaté. Sur ce dernier, nous avons également étudié l'effet d'un apport simultané de gypse.

Ces sols présentent une structure battante très dégradée. Nos précédents résultats (SIDI, 1987) ont montré que l'apport de paille procure une amélioration éphémère de la stabilité des agrégats dans les quinze premiers jours et une amélioration plus durable à partir du sixième mois.

(1) ORSTOM, 70, Route d'Aulnay, 93140 Bondy, France.

(2) INRA d'Alger, Belfort, El-Harrach, Alger, Algérie.

Nos expériences apportent également de nombreuses mesures sur l'évolution des stocks organiques de ces sols dans des conditions expérimentales contrôlées.

Il était nécessaire de préciser parallèlement la cinétique des caractéristiques mesurées relatives aux matières organiques.

L'analyse des données « carbone organique total » et « matières légères séparées par densimétrie » avaient pour but leur mise en équations en fonction du temps d'incubation et la comparaison des résultats avec d'autres expériences du même type.

Nos données ont permis également la prise en compte du paramètre « quantité de paille apportée ».

L'ensemble des données nous a permis de proposer et valider des modèles prévisionnels d'évolution des compartiments stables et labiles des matières organiques des sols sous l'effet d'apports végétaux. Nous rappelons ci-dessous les principaux modèles en usage qui interviendront dans les discussions et qui permettent de situer nos propositions.

Le choix d'un modèle d'évolution lié à l'interprétation de données agronomiques et pédologiques dépend du volume et de la nature de celles-ci. Ainsi dans bien des cas, les auteurs se limitent à des modèles monocompartimentaux dérivés du modèle de HENIN et DUPUIS (1945). En fonction des conditions expérimentales et des mesures les auteurs ont été conduits à modifier le modèle initial selon différentes cinétiques de décroissance comme le montrent les quelques exemples du tableau 1.

Tableau 1 : Cinétique de décroissance de modèles monocompartimentaux appliqués au carbone des sols. A = contenu carboné exprimé généralement en pour mille massique du sol sec. t est le temps exprimé en année. A₀ = valeur de A au temps 0. α = coefficient de décroissance. Dans le seul cas de la décroissance exponentielle le temps de demi-vie est indépendant de la quantité de matière à détruire. Dans ce cas également appelé « mélange parfait » le temps moyen de résidence est égal au temps de renouvellement soit 1/α.

Decreasing kinetics of monocompartmental models applied to the soil carbon. A is carbon content generally expressed in terms of pour mille of dry soil. t is the time expressed in year. A₀ is the value of A at time 0. α is decreasing coefficient. Only in case of exponential decay, the half-time is independent of the amount of matter to be destroyed. Across this so-called « well-mixed reservoir » the mean residence time is equal to the turn-over time, namely 1/α.

Loi cinétique	Ordre 0 Linéaire	Ordre 1 exponentielle	Ordre 2 hyperbolique	Ordre n puissance
Modèle $-dA/dt$	$A^{\alpha} \rightarrow$	$A^{\alpha(A)} \rightarrow$	$A^{\alpha(A)^2} \rightarrow$	$A^{\alpha(A)^n} \rightarrow$
Dimension α M = %/100 massique T = temps	MT ⁻¹	T ⁻¹	M ⁻¹ T ⁻¹	M ¹⁻ⁿ T ⁻¹
Evolution A	A ₀ -αt	A ₀ exp(-αt)	A ₀ (1+A ₀ αt) ⁻¹	A ₀ (1+α(n-1)A ₀ ⁿ⁻¹ t) ^{-1/(n-1)} n > 1
Demi-vie A	A ₀ /2α	Log 2/α	1/αA ₀	(2 ⁿ⁻¹ -1)/(α(n-1)A ₀ ⁿ⁻¹)
Exemples d'applications au carbone des sols	pour mémoire	HOFMAN et RUYMBEKE (1979) BOIFIN et al. (1986)	BOIFIN et FLEURY (1974)	BALESDENT (1982)

L'apparition de modèles à plusieurs compartiments de décroissances supposées homogènes est allée de pair avec l'augmentation du volume des données collectées et la qualité de leur analyse statistique.

Les compartiments correspondent très rarement à des constituants organiques définis ou à des fractions mesurables quantitativement. Les données physiques, chimiques ou biologiques permettent cependant de leur affecter une cinétique de décroissance et d'estimer les flux qui les traversent.

Ainsi, le modèle de HENIN, MONNIER et TURC (1959) permet la prise en compte des mesures densimétriques de matières légères (HENIN et TURC, 1949) assimilées alors à une fraction labile.

Le modèle de JENKINSON et RAYNER (1977) a été validé à la fois par des mesures de décroissances de matières végétales, de biomasse microbienne (JENKINSON, 1965) et de datations pour estimer les paramètres d'évolution à long terme du stock humique d'un sol soumis à un système cultural donné.

Les modèles de PAUL et VAN VEEN (1978) et JENKINSON et LADD (1981) concernent des évolutions à plus court terme. Le premier a été validé surtout par des mesures de décroissance de constituants biochimiques des plantes dans les sols, le deuxième essentiellement par des mesures de biomasse microbienne.

On peut remarquer que, contrairement aux modèles d'évolution globale de tout le carbone (tableau I), les lois cinétiques décrivant la décroissance de chaque compartiment dans les modèles multicompartimentaux ci-dessus sont toujours du premier ordre.

I. MATERIELS ET METHODES

A) Matériels utilisés et protocole expérimental

Les principales caractéristiques du sol peu évolué d'apports à tendance vertique et du sol salé carbonaté à hydromorphie de profondeur sont présentées dans le tableau II.

Tableau II : Sols utilisés pour les expériences. CE = conductivité électrique de l'extrait pâte saturée (en mmhos/cm), CaCO₃ = calcaire total, les valeurs du carbone organique sont indiquées dans le tableau III.

Soils under study. CE = electrical conductivity of saturated extract (in mmhos/cm), CaCO₃ = total calcareous, organic carbon values are indicated in Table III.

type de sols et horizons prélevés	pH (H2O)	argile %	CE	C/N	Complexe absorbant				
					CaCO ₃ %	Na	K	Ca	Mg
alluvial à tendance vertique 0-32 cm	7,2	48	0,7	13	1,2	1,1	0,39	15,18	4,44
Salé carbonaté à hydromorphie de profondeur. 0-21 cm	8,0	49	4,7	8,5	28	9,9	1,61	66,40	7,62

La paille de blé, découpée et calibrée entre 0,2 et 2 mm a été ajoutée aux sols à des doses correspondant à 0 (témoin), 2,7 et 8,1 pour mille de carbone dans le mélange sec. Des ajouts d'ammoniac mélangé à l'eau d'humectation ont permis de ramener à 15 le rapport C/N de la paille apportée.

Les échantillons de 250 g de sols amendés ou non (témoins) ont été placés dans des tubes PVC de 7,5 cm de diamètre intérieur bouchés à la partie inférieure par un grillage plastique surmonté de 2 cm de gravier.

Ces tubes ont été mis à incuber à une température constante de 28 °C avec une alternance humectation-dessiccation (teneur en eau ramenée tous les trois jours à 80 % de l'humidité équivalente à la capacité de rétention au champ) donc *sans perte par drainage*. Les prélèvements ont été effectués aux temps : 0, 15, 30, 90, 180, 270 jours d'incubation. Les essais conduits en double comprenaient donc 36 tubes pour chacune des trois expériences notées comme suit :

VE = Sol peu évolué d'apport à tendance vertique.

SA = Sol salé carbonaté.

SG = Sol salé carbonaté amendé à 1 % de gypse.

A la fin de chacune des périodes d'incubation prévues dans le plan d'expériences, les sols des 18 tubes correspondants ont été prélevés et mis à sécher avec réunion des deux répétitions. Après écrasement des mottes, tamisage à 2 mm et homogénéisation les échantillons ont été prélevés au partiteur et les teneurs en carbone organique mesurées par oxydation avec le mélange sulfochromique selon la méthode de WALKLEY et BLACK. Les teneurs en carbone des échantillons provenant du sol non carbonaté ont pu être vérifiées par combustion sous oxygène à 1200°C et dosage du CO₂ dégagé par coulométrie.

Le coefficient de variation établi sur 15 prises d'essai d'un même sol est de 1,9 % et les intervalles de confiance au niveau de probabilité 0,95 ont été reportés sur la figure II.

Les matières végétales légères sont obtenues par séparation densimétrique avec de l'acide phosphorique 2M (DABIN, 1976). Bien que moins dense ($d = 1,2$) que d'autres liqueurs densimétriques (HENIN et TURC, 1949) (MONNIER et al., 1962), l'acide phosphorique est moins dangereux à manipuler, il détruit les carbonates en favorisant la libération de matières légères séquestrées et permet le dosage de matières organiques acido-solubles (acides fulviques libres) contenues dans les sols et débris végétaux.

Le carbone des particules recueillies dans le surnageant est dosé par combustion et coulométrie du CO₂.

B) Outils statistiques et informatiques

Le logiciel SPCLAS (PANSU, 1983) a permis l'extraction des données étudiées selon chacun des trois plans d'expérience, leur présentation graphique avec les intervalles de confiance et les premiers essais d'ajustement linéaires.

L'ajustement non linéaire des courbes de carbone a été réalisé au moyen du logiciel STATGRAPHICS (société UNIWARE) qui utilise la méthode analytique de l'algorithme de MARQUARDT (1963) et avec le logiciel OPTIM (CHEVILLOTTE et TOUMA, 1987) par la méthode de MARQUARDT et la méthode SIMPLEX des gradients.

Nous avons écrit un programme donnant pour chaque modèle trouvé : les résidus d'ajustement, le coefficient de détermination R², le test F de Fisher-Snedecor, la probabilité associée Pr. de refus du modèle et l'estimation de l'écart-type s des valeurs prédites.

Le calcul des approximations de départ des modèles non linéaires est réalisé de la manière suivante :

— Estimation de l'exponentielle correspondant au compartiment stable à partir de 90 jours d'incubation.

— Déduction des valeurs prédites avec cette exponentielle aux valeurs mesurées en début d'incubation.

— Estimation de l'exponentielle correspondant au début d'incubation.

Il va de soi que pour un même phénomène, plusieurs modèles peuvent convenir. Par exemple, là où BALESDENT (1982) trouve une fonction puissance, JENKINSON (1977) trouve une somme d'exponentielles. C'est pourquoi, nous avons toujours essayé plusieurs modèles et dans ce qui suit seuls sont indiqués les ajustements les plus significatifs.

Nous avons programmé les modèles d'évolution en basic sous leur forme matricielle. Nous avons également utilisé un logiciel turbo-pascal d'intégration numérique d'équations différentielles (G. PICHON, ORSTOM, com. pers.).

II. EVOLUTION DU CARBONE ORGANIQUE TOTAL

A) Equation trouvée

Le meilleur ajustement de la teneur du carbone organique C_t en fonction du temps t que nous ayons pu observer est de la forme :

$$C_t = a \exp(-\alpha t) + b \exp(-\beta t) \quad (1)$$

dans lequel les constantes a et b représentent les valeurs en carbone de deux compartiments instables et stables à l'instant initial alors que α et β représentent respectivement leurs coefficients de décroissance. Nous avons réalisé ces ajustements sur les trois séries d'essais ayant reçu les plus forts amendements en paille. Les mesures sont alors moins sujettes à des fluctuations d'échantillonnage.

Les courbes correspondant aux amendements plus faibles ont été déduites des premières en conservant les coefficients α et β des exponentielles et en posant :

$$X_1 = \exp(-\alpha t)$$

$$X_2 = \exp(-\beta t)$$

Une régression multiple sans constante a permis alors d'estimer les coefficients a et b des modèles :

$$C_t = a X_1 + b X_2$$

Les paramètres a , b , α , β sont reportés dans le tableau III avec les tests statistiques d'ajustements.

Tableau III : Décroissance du carbone organique total : α , β , a , b sont les paramètres de l'équation (1) ; m et Co représentent l'apport de carbone et la valeur mesurée au temps 0.

Les équations pour $m = 8,1$ pour mille sont obtenues par les méthodes non linéaires. Les autres équations sont obtenues par la méthode de régression multiple indiquée dans le texte.

Decrease of total organic carbon : α , β , a , b are the parameters of the equation (1) ; m and Co correspond to the carbon supply and the value measured at time 0.

Equations concerning $m = 8,1$ pour mille are obtained with non-linear methods. The other equations are obtained with the multiple regression method mentioned in the text.

Exp.	m	Co	$-\alpha$	$-\beta$	a	b	R^2	$F(3, 3)$	Pr.	s
		°/ooC		-1/année	°/oo C					
VE	8,1	21,05	14,51	0,015	4,99	15,68	0,94	15,8	0,05	0,67
SA	8,1	27,27	16,24	0,007	9,48	17,95	0,98	60,6	0,01	0,63
SG	8,1	26,30	24,11	0,074	6,17	20,03	0,98	40,2	0,01	0,56
VE	2,7	15,60	14,51	0,015	2,23	13,23	0,79	4,0	0,28	0,61
SA	2,7	21,00	16,24	0,007	5,36	15,33	0,87	6,5	0,16	1,10
SG	2,7	20,80	24,11	0,074	6,39	14,91	0,90	9,2	0,10	1,16
VE	0	12,95	14,51	0,015	1,57	11,68	0,68	2,2	0,53	0,59
SA	0	17,75	16,24	0,007	3,47	13,97	0,94	15,2	0,05	0,47
SC	0	17,75	24,11	0,074	3,68	13,92	1,00	50,9	0,01	0,30

B) Résultats et discussion

Tableau IV : Demi-vies des compartiments labiles (A) et stables (B) selon différentes expériences d'incubation. Les ° indiquent des valeurs obtenues à partir des mesures de Carbone. Les autres valeurs sont obtenues par des mesures C14 ou N15.

Half-lives of the labile (A) and stable (B) compartments according to different experiments of incubation. The ° show values resulting from carbon measurements. The other values result from C14 or N15 measurements.

Compartiments				A	B
Materiel	lieu	auteurs	durée de l'expérience (Années)	T1/2 semaines	T1/2 Années
Ray-gras C14	Angleterre	JENKINSON (1977)	10	12,6	8,2
		JENKINSON (1965)			25 °
Ray-gras C14	Nigeria	JENKINSON et AYABANA (1977)	2	3,7	1,8
Luzerne C14	Australie	LADD et Coll. (1981)	4	1,4	4,5
			4	1,7	1,9
			4	1,6	5,3
			4	1,8	6,4
Luzerne N15	Australie	LADD et Coll. (1981)	4	5,8	9,0
			4	28	-
			4	2,6	8,0
			4	3,4	6,8
Blue Gamma USA C14	USA	NYHAN (1975)	1	5,4	
			1	6,9	
Paille Blé Canada C14	Canada	VORONEY (1983)	10	19,1	7,6
			10	25,7	8,3
Paille blé Allemagne C14	Allemagne	SAUERBECK et GONZALEZ (1977)	9	24,5	7,6
			9	20,1	6,9
			4	11,1	3,5
			4	9,4	4,6
			4	7,6	4,8
			4	9,7	4,5
			4	8,0	4,4
			4	8,2	4,5
Paille blé Costa Rica C14	Costa Rica	SAUERBECK et GONZALEZ (1977)	1	6,1	-
Paille blé laboratoire	laboratoire	PAUL et VAN VEEN (1978)	1	2,4	-
Paille blé laboratoire	laboratoire	Present VE	1	2,5	46 °
		travail SA	1	2,2	90 °
		SG	1	1,5	9 °

Dans le tableau IV, les résultats obtenus sont comparés à ceux présentés par JUMA et MAC GILL (1986) selon un modèle à deux exponentielles et relatifs à la décomposition de matériel végétal marqué.

Dans ce tableau nous avons ajouté les ajustements que nous avons réalisés sur les données de NYHAN (1975), les résultats de PAUL et VAN VEEN (1978) en laboratoire et ceux de JENKINSON (1965) sur le compartiment stable non marqué des sols de Rothamsted.

1. Compartiment labile

Nos estimations des temps de demi-vie sont inférieures à celles obtenues dans les conditions naturelles avec la paille de blé. Elles sont proches de celles enregistrées par PAUL et VAN VEEN (1978) au laboratoire, sans correction de croissance de la biomasse. Ceci confirme les observations de ces auteurs au sujet des différences existant entre les expérimentations de laboratoire et celles en conditions naturelles.

Nos valeurs sont également proches de celles trouvées par JENKINSON et AYABANA (1977) et LADD et Coll. (1981), avec d'autres matières végétales dans des conditions naturelles de température et d'humidité élevées donc favorables à une décomposition rapide des résidus végétaux (Nigéria, Australie).

Contrairement aux hypothèses de VAN VEEN et PAUL (1981), la forte quantité d'argiles de nos sols ne renforce donc pas la stabilité des matières labiles.

2. Compartiment stable

Les temps de demi-vie du compartiment stable, sont, en revanche, beaucoup plus importants que ceux observés par les auteurs (tableau IV) pour des expériences au champ.

Il faut signaler que la plupart des expériences sont conduites sur des durées plus grandes que les nôtres, et que par contre, les données en début d'incubation qu'ils ont collectées sont peu nombreuses.

A ce sujet, JUMA et Mac GILL (1986), signalent un net aplatissement de la courbe de décomposition provenant des données de SAUERBECK et GONZALEZ (1977) au Costa Rica, pour une durée d'expérimentation d'une année. Nous avons observé le même phénomène sur les données de NYHAN (1975), également pour une durée d'expérience d'un an. On peut donc supposer l'existence d'une stabilisation temporaire des matières organiques résistantes qui peut disparaître après un an. Toutefois la durée limitée de nos expériences ne permet pas d'extrapoler au delà de la première année et l'expérience de JENKINSON et AYABANA (1977), conduite sur deux ans au Nigéria, semble infirmer cette hypothèse.

3. Hypothèse concernant la stabilité des matières humifiées

La décroissance observée du compartiment stable est, dans notre cas, beaucoup plus proche de celle du carbone initialement présent dans les expériences de JENKINSON (1965) que de celles trouvées pour les compartiments stables provenant des enfouissements de matériaux marqués.

Ces faits suggèreraient un temps moyen de résidence différent du temps de renouvellement pour les matériaux entrant dans le compartiment stable en contradiction avec les hypothèses de décroissance exponentielle (tableau I). A moins qu'il y ait, comme le suggèrent JENKINSON et AYABANA (1977), il existe un compartiment possédant une durée de vie plus grande que ceux identifiés dans les expériences réalisées avec du carbone marqué.

Les doses de pailles enfouies dans nos expériences sont plus importantes que celles utilisées par les autres auteurs du tableau IV. Elles peuvent engendrer une formation d'acide acétique après une dizaine de jours d'incubation pouvant conduire à une diminution de l'activité biologique et de la minéralisation (LYNCH, 1979).

Cette hypothèse est peu vraisemblable dans le cas du sol carbonaté où on enregistre une augmentation des carbonates correspondant à une fixation du CO_2 les 15 premiers jours puis une diminution correspondant à une neutralisation des acides (H. SIDI, 1987).

Des observations de JENKINSON (1977) et JENKINSON et AYABANA (1977) il ressort qu'en l'absence de stress hydrique, les seuls paramètres identifiés intervenant fortement sur les coefficients cinétiques sont la température (qui dans le domaine étudié agit sur les coefficients selon la loi de VAN'T HOFF) et la quantité d'argile du sol.

Ce dernier paramètre intervient sans doute fortement dans notre expérience puisque les sols sont très argileux, avec des argiles 2:1 gonflantes alors que l'essai de JENKINSON et AYABANA a été réalisé sur des sols sableux avec des argiles kaolinitiques.

Nous avons tenté d'utiliser nos données pour valider des modèles prévisionnels ne différenciant pas carbone apporté et carbone présent stabilisé ou non.

III. VALIDATION DES MODELES A DEUX COMPARTIMENTS

A) Le modèle de HENIN et al. (1959) et sa validation par nos mesures de carbone total

Le modèle I de HENIN, MONNIER et TURC (1959) reporté dans la figure 1 distingue les matières organiques labiles A alimentées par les apports végétaux m et les matières humifiées B formées d'un apport provenant des précédentes, et qui se minéralisent beaucoup plus lentement.

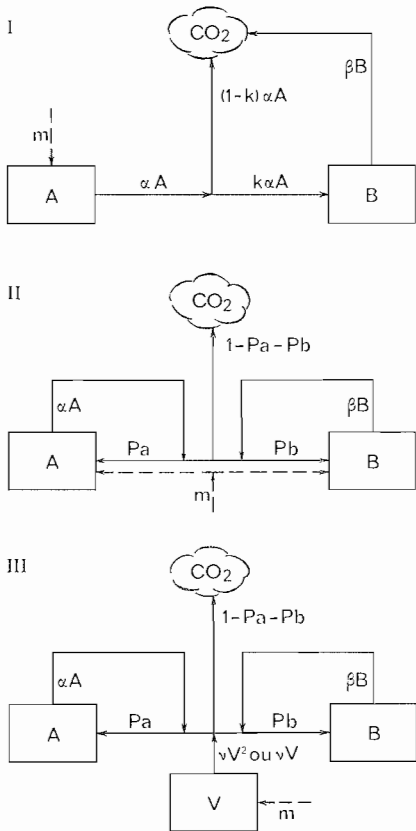


Figure 1 : Les modèles validés par nos expériences. Les traits pointillés expriment une possible différence d'échelle de temps entre apports et décroissances.

I = modèle de HENIN et al. (1959) correspondant aux équations de vitesse (2) et (3) et aux formules d'évolution du carbone organique (4) et (5).

II = modèle proposé à deux compartiments correspondant aux équations (6) et (7).

III = modèle proposé à trois compartiments correspondant aux équations de vitesse (11), (12) et (13) et la formule matricielle (14).

The models validated with our experiments. Dotted lines show a possible time scale difference between carbon amendments and decay.

I = HENIN et al. model (1959) corresponding to differential equation (2) and (3) and organic carbon evolution formula (4) and (5).

II = Suggested two compartment model corresponding to equations (6) and (7).

III = Suggested three compartments model corresponding to differential equations (11), (12), (13) and matricial formula (14).

Pour l'ajustement à nos données, nous avons modifié un peu l'expression des équations présentées initialement.

En effet, m est un apport discontinu avec une échelle de temps différente de celle du coefficient de décroissance.

Les équations de vitesse de décroissance de chaque compartiment s'expriment alors par :

$$\text{Compartiment labile A : } d(A + m)/dt = -\alpha(A + m) \quad (2)$$

$$\text{Compartiment stable B : } d(B)/dt = k\alpha(A + m) - \beta(B) \quad (3)$$

avec

t = temps (en année)

(A + m), (B) = carbone organique total des compartiments A et B (en pour mille)

α = coefficient de destruction des matières labiles (en année⁻¹)

k = coefficient isohumique

β = coefficient de minéralisation des matières stables (en année⁻¹)

La somme des deux expressions obtenues par intégration des équations (2) et (3) nous fournit la formule d'évolution du carbone organique total Ct soit :

$$Ct = [Ao(1 - k\alpha/(\alpha - \beta)) + m(1 - k\alpha/(\alpha - \beta))] \text{EXP}(-\alpha t) + [Bo + kAo\alpha/(\alpha - \beta) + mk\alpha/(\alpha - \beta)] \text{EXP}(-\beta t) \quad (4)$$

et comme β est très petit devant α :

$$Ct = [Ao(1 - k) + m(1 - k)] \text{EXP}(-\alpha t) + (Bo + kAo + km) \text{EXP}(-\beta t) \quad (5)$$

Sous cette forme, le carbone évolue comme une somme de deux exponentielles avec des coefficients multiplicatifs linéaires en fonction de l'apport. Nous avons testé cette linéarité pour chaque expérience afin d'obtenir le modèle correspondant à l'équation (5) de la forme :

$$Ct = (a_0 + a_1 m) (\text{EXP}(-\alpha t)) + (b_0 + b_1 m) \text{EXP}(-\beta t) \quad (5')$$

Les valeurs des paramètres des équations (5) et (5') sont reportées dans le tableau V, où R2a et R2b représentent les coefficients de détermination des deux ajustements linéaires des coefficients a et b de l'équation (1) en fonction de l'apport m. Les courbes correspondant à ces équations sont reportées dans la figure 2.

Il ressort du tableau V que la linéarité en fonction des apports est meilleure pour le compartiment stable. Elle est satisfaisante pour expliquer la décroissance carbonée selon le modèle de HENIN et al. (1959) dans les expériences VE et SA. Le modèle s'applique mal par contre à l'expérience SG.

Tableau V : Estimations des paramètres des équations 5 et 5' correspondant au modèle de HENIN et al. (1959) : k = b1, δk = écart de k avec l'estimation k = 1 - a1, Ao et Bo estimés avec k = b1, δAo et δBo = écarts de Ao et Bo avec l'estimation k + δk .

Parameters evaluations in equations (5) and (5') corresponding to the model by HENIN et al. (1959) : k = b1, δk = difference between the evaluation k = 1 - a1, Ao and Bo are evaluated with k = b1, δAo and δBo = differences on Ao and Bo with the evaluation k + δk .

Exp	ao	a1	R2a	bo	b1	R2b	k	δk	Ao	δAo	Bo	δBo
VE	1,36	0,43	0,98	11,77	0,49	1,00	0,49	+0,08	2,68	+0,47	10,46	-0,47
SA	3,42	0,74	1,00	13,98	0,49	1,00	0,49	-0,23	6,73	-2,13	10,68	+2,13
SG	4,49	0,26	0,71	13,47	0,78	0,98	0,78	-0,04	(20,4)	-	(-2,4)	-

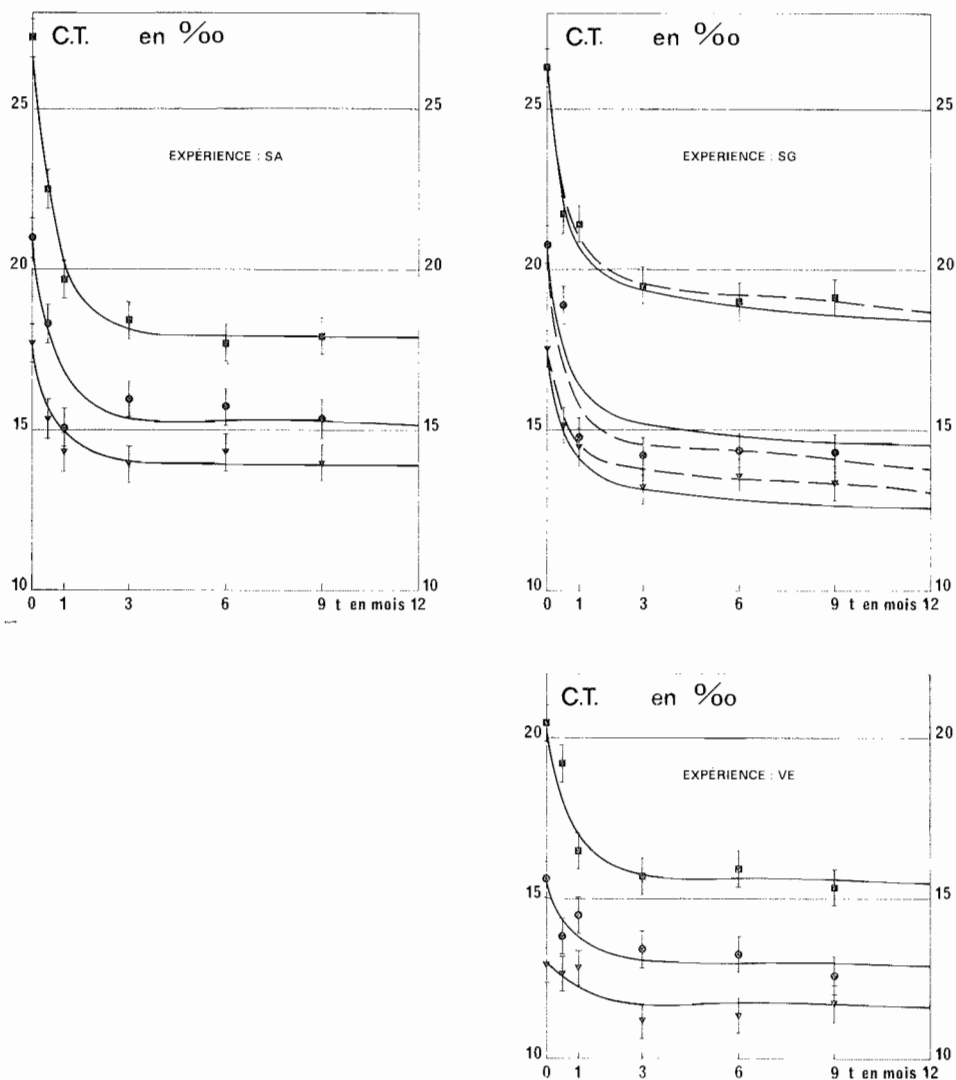


Figure 2 : Ajustements réalisés selon les équations (5') (tableau V) du modèle de HENIN et al. (traits pleins) et selon notre modèle II (figure 1) à deux compartiments (pointillés). Les ajustements sont identiques pour les expériences VE et SA. Les points expérimentaux sont représentés avec leurs intervalles de confiance au niveau 0,95 pour les trois amendements de paille (8,1 pour mille ■, 2,7 pour mille ● et 0 ▼ de carbone).

Fitting with the equations (5') (table V) of HENIN et al. (1959) model and our model II in figure 1 (dotted lines). Adjustments are identical in VE and SA experiments. Experimental points are represented with their 95 % confidence intervals for the three supply of carbon straw : 8,1 pour mille ■, 2,7 pour mille ● and 0 ▼.

B) Nouvelle présentation d'un modèle à deux compartiments

Les paramètres de l'équation (5) (tableau V) montrent que le pourcentage de carbone instable initialement présent dans le sol salé carbonaté (SA), est plus grand que dans le sol à tendance vertique (VE). L'activité biologique de ce dernier est d'ailleurs moins importante, comme le montre également la disparition moins rapide des polysaccharides (SIDI, 1987).

L'apport de gypse semble produire une augmentation simultanée des processus d'humification et de minéralisation et l'expérience SG ne permet pas de valider le modèle de HENIN et al. (1959).

Nous proposons une autre présentation d'un modèle à deux compartiments (modèle II, figure 1) prenant mieux en compte le renouvellement permanent (sauf contrainte climatique majeure) des matières organiques d'un compartiment à l'autre et la possibilité de passage des apports vers chacun des deux compartiments.

Pa et Pb représentent les proportions qui passent respectivement dans les compartiments instable A et stable B, soit de façon discontinue (traits pointillés) au moment des apports soit en permanence lors des processus de renouvellement. Les vitesses d'évolution de chaque compartiment s'expriment alors comme suit :

$$\text{Compartiment instable A : } d[A]/dt = (mPa) + \alpha[A]Pa + \beta[B]Pa - \alpha[A] \quad (6)$$

$$\text{Compartiment stable B : } d[B]/dt = (mPb) + \alpha[A]Pb + \beta[B]Pb - \beta[B] \quad (7)$$

où les parenthèses expriment une différence d'échelle de temps et les crochets, les teneurs de chaque compartiment en pour mille massique.

Dans les conditions d'état stable : $d[A]/dt = d[B]/dt = 0$
soit d'après les deux équations de vitesses :

$$[A] = [B] \beta Pa / \alpha Pb \text{ et } [B] = [A] \alpha Pb / \beta Pa$$

Les temps de renouvellement Ta et Tb de chaque compartiment A et B s'expriment alors par $Ta = [A] / \alpha[A] = 1/\alpha$ et $Tb = 1/\beta$.

Les valeurs de carbone à l'instant initial permettent d'estimer les proportions Pa et Pb alors que les valeurs après un intervalle de temps δt fournissent une estimation de la somme Pa + Pb proche du coefficient isohumique de HENIN et al.

Les valeurs de Pa et Pb sont respectivement de 0,3 et 0,25 pour l'expérience VE, 0,24 et 0,1 pour l'expérience SA, 0,28 et 0,32 pour l'expérience SG.

Le calcul des valeurs prédites par ce modèle (fig. 2) peut s'effectuer par deux méthodes donnant des résultats équivalents : intégration numérique des équations (6) et (7) ou sous forme matricielle de manière analogue au modèle à trois compartiments présenté ci-après.

Les courbes de la figure 2 montrent des ajustements confondus avec ceux du modèle de HENIN et al. en ce qui concerne les expériences VE et SA. Le modèle proposé permet un meilleur ajustement des données de l'expérience SG.

Les calculs montrent une moindre décroissance en fonction du temps pour le compartiment labile que dans le modèle précédent. Comme prévu, ce modèle traduit donc mieux une réalité physique : la présence de carbone facilement décomposable provenant des processus de renouvellement qui accompagnent la minéralisation de l'humus même dans les sols évolués.

IV. PRISE EN COMPTE DE LA CINETIQUE D'EVOLUTION DES MATIERES ORGANIQUES LEGERES ET PROPOSITION D'UN MODELE A TROIS COMPARTIMENTS

A) Cinétique de décroissance des matières organiques légères

Le carbone des matières légères extraites par fractionnement densimétrique en début d'incubation, juste après la première humectation, est toujours proche de 40 %

du carbone apporté par la paille. On ne peut donc assimiler ces fractions à la paille apportée. GRAFIN (1971) décrit le carbone des matières légères comme un carbone libre non remanié dans le sol alors que DABIN (1976) s'en tient au terme « matières organiques légères ».

La décroissance carbonée des matières organiques légères en fonction du temps suit une loi hyperbolique pour les expériences VE et SG alors que la loi est exponentielle dans l'expérience SA soit :

$$\text{Expériences VE et SG : } V = V_0 / (1 + V_0 \Gamma t) \quad (8)$$

$$\text{Expérience SA : } V = V_0 \text{ EXP}(-\Gamma t) \quad (9)$$

Avec :

t = temps (en année)

V = carbone au temps t des matières légères (en pour mille de la masse totale de sol sec)

V_0 = valeur de V pour t = 0

Γ = Coefficient de décroissance du carbone des matières légères (exprimé en année⁻¹ pour mille⁻¹ pour l'équation (8) et année⁻¹ pour l'équation (9) traduisant à la fois sa fixation dans le sol et sa minéralisation.

Dans chaque cas, les ajustements ont été trouvés en supposant que les valeurs V en début d'incubation sont les plus précises.

Des régressions linéaires ont permis alors d'estimer le coefficient Γ du modèle :

$$Y = \Gamma t \quad (10)$$

avec :

$Y = 1/V - 1/V_0$, dans le cas de l'équation (8) et

$Y = \text{Log}(V/V_0)$, dans le cas de l'équation (9)

Les paramètres correspondant aux équations (8) et (9) sont présentés dans le tableau VI, et les courbes de valeurs prédites dans la figure 3.

Tableau VI : Estimation des paramètres des équations (8) et (9) décrivant la décroissance des matières organiques légères. Tous les ajustements sont significatifs au niveau 0,99 sauf pour l'apport 2,7 de l'expérience SG.

Evaluation of the parameters in equation (8) and (9) describing the decrease of light organic materials. All fitting are significant at 0.99 level except for the supply 1 % from the SG experiment.

Exp.	m o/ooC	Equ. V	V_0	Γ	F(1, 5)	s	T1/2
VE	0	(8)	0,24	39,86	98	0,02	5,4
VE	2,7	(8)	1,67	6,41	231	0,08	4,9
VE	8,1	(8)	2,66	1,92	163	0,15	10,2
SA	0	(9)	0,25	5,01	44	0,03	7,2
SA	2,7	(9)	1,16	2,77	53	0,14	13,0
SA	8,1	(9)	2,25	2,92	144	0,03	12,3
SG	0	(8)	0,23	38,35	40	0,03	5,9
SG	2,7	(8)	1,13	9,13	14	0,24	5,0
SG	8,1	(8)	2,19	3,19	416	0,03	7,4

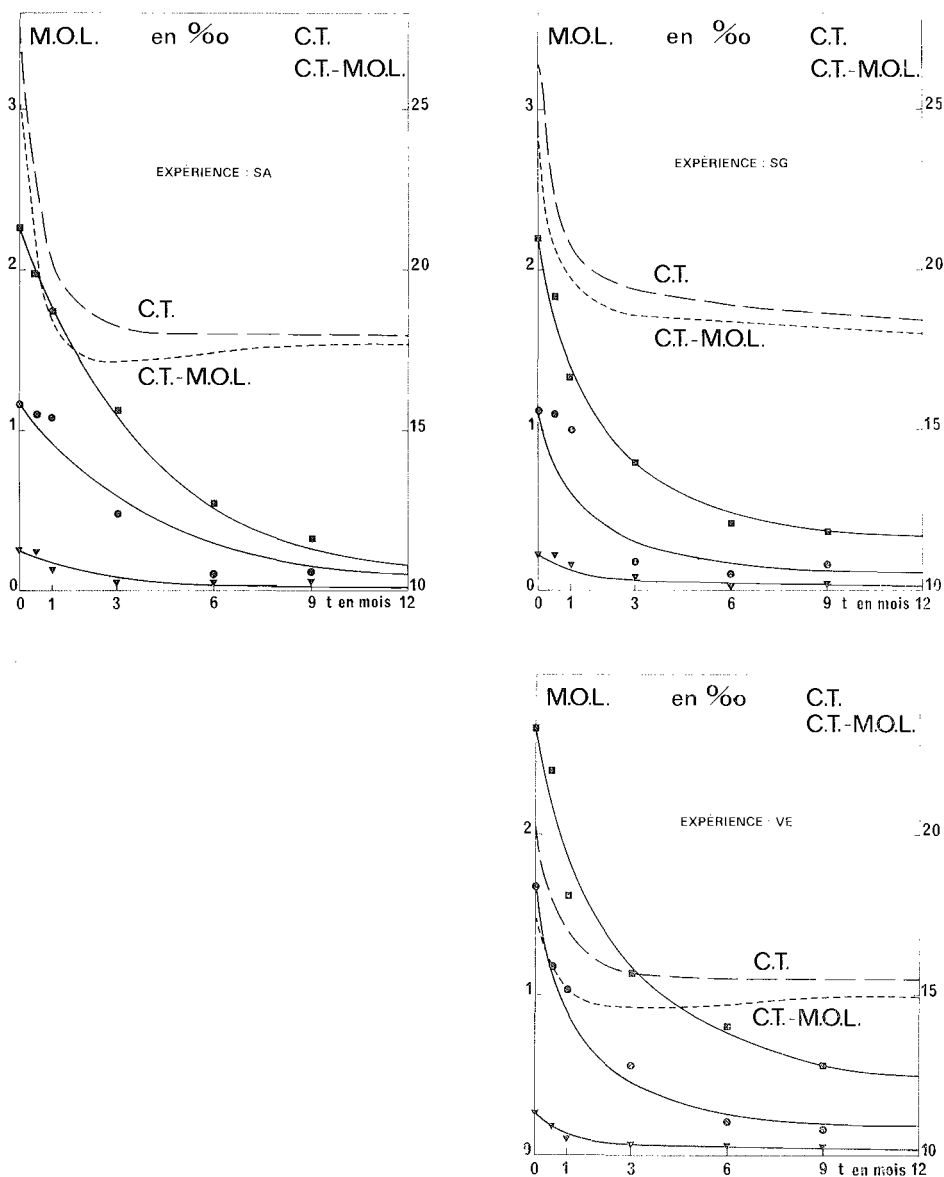


Figure 3 : Décroissance des matières végétales séparées par densimétrie (MOL). Valeurs expérimentales de 3 apports (8,1 pour mille \blacksquare , 2,7 pour mille \bullet et 0 \blacktriangledown) et valeurs prédites par les équations (8) et (9) (tableau VI). Les courbes en pointillés représentent sur une échelle différente, les valeurs prédites du carbone total (CT), et du carbone non séparé par densimétrie (CT - MOL) pour les apports à 8,1 pour mille de carbone.

Decay of plant materials separated by densimetry MOL. Experimental values of the three supplies (8,1 pour mille \blacksquare , 2,7 pour mille \bullet , and 0 \blacktriangledown) and predicted values of (8) and (9) equations (table VI). The dotted curves represent on a different scale the predicted values of total organic carbon (CT) and carbon not separated by densimetry (CT-MOL) for the supplies of 8,1 pour mille carbon straw.

B) Discussion

On ne peut pas affirmer dans le cas des expériences VE et SG que les lois de décroissance des matières organiques légères correspondent exactement à une cinétique d'ordre 2. Dans ce cas, comme nous l'indique le tableau I, les temps de demi-vie devraient dépendre de la quantité de paille apportée et le coefficient Γ devrait être constant.

Or, nos coefficients Γ diminuent lorsque l'apport de paille augmente, les temps de demi-vie restant relativement le paramètre le plus constant. Nous pensons que ce phénomène peut s'expliquer par une insuffisance quantitative de microorganismes par rapport à la quantité de paille enfouie. La biomasse microbienne deviendrait alors un facteur limitant.

Ces lois de décroissance des matières légères sont néanmoins très différentes de celles trouvées pour l'ensemble du carbone.

Si la vitesse de décroissance du carbone des matières légères est égale à celle du carbone de la paille enfouie, nos résultats sont en contradiction avec les hypothèses de JENKINSON et RAYNER (1977) et VAN VEEN et PAUL (1981) décrivant la décroissance des matières végétales enfouies dans les sols.

En effet, ces auteurs l'assimilent à une somme de compartiments plus ou moins décomposables à cinétique exponentielle. Or, nous ne trouvons pas de résultats expérimentaux pouvant vraiment étayer cette hypothèse. Les courbes d'évolution de végétaux marqués enfouis ne nous renseignent pas sur l'état du carbone marqué dans le sol au moment où il est mesuré. Par ailleurs, la décomposition d'un végétal peut-elle raisonnablement être assimilée à la somme des lois d'évolution en fonction du temps de ses constituants biochimiques ?

L'information apportée par la décroissance de nos matières légères, si imparfaites que soient nos mesures, est donc précieuse dans le débat concernant la cinétique de décroissance des végétaux dans les sols.

Nous remarquons également (tableau VI) que les temps de demi-vie du carbone de ces matières légères est supérieur au temps de demi-vie du carbone du compartiment labile (tableau VI). Ceci confirme notre hypothèse du modèle II de la figure I, c'est-à-dire que la totalité des matières végétales apportées ne peut être identifiée au seul compartiment labile de HENIN et al. (1959).

C) Présentation du modèle à 3 compartiments

Si l'on retranche des teneurs en carbone total les valeurs du carbone des matières organiques légères, les courbes obtenues (figure 3), peuvent encore être ajustées à des sommes d'exponentielles comme précédemment.

Pour prévoir l'évolution simultanée du carbone libre non remanié provenant des végétaux (compartiment V), du carbone d'origine végétale et microbienne de faible durée de vie (compartiment A) et du carbone stable de l'humus (compartiment B), nous proposons le modèle III de la figure I.

Dans le cas d'une évolution hyperbolique des matières légères et avec un apport m , les vitesses d'évolution de chaque compartiment s'expriment par :

$$d[V]/dt = -\Gamma[V]^2 \quad (+ m) \quad (11)$$

$$d[A]/dt = Pa\Gamma[V]^2 + Pa\alpha[A] + Pa\beta[B] - \alpha[A] \quad (12)$$

$$d[B]/dt = Pb\Gamma[V]^2 + Pb\alpha[A] + Pb\beta[B] - \beta[B] \quad (13)$$

avec :

t = temps (en année)

m = apport de carbone végétal en (pour mille du sol sec). Les parenthèses expriment une possible différence d'échelle de temps entre apports et décroissances.

$[V,]$ $[A,]$ $[B]$ = teneur carbonée de chaque compartiment (en pour mille de sol sec).
 P_a, P_b = proportions de carbone entrant dans les compartiments A et B.
 α, β = coefficients de décroissance des compartiments A et B (en année⁻¹)
 Γ = coefficient de décroissance hyperbolique du carbone à l'état végétal (en année⁻¹ pour mille⁻¹).

Si l'évolution des matières légères est exponentielle, il faut remplacer $[V]^2$ par $[V]$ dans les équations (11), (12) et (13).

Dans ce cas, le modèle fonctionne de manière analogue à celui proposé par JENKINSON et LADD (1981), pour décrire le renouvellement de la biomasse et des métabolites sous l'effet d'apports végétaux.

La principale différence réside dans le fait que notre compartiment instable A ne correspond pas à la seule biomasse microbienne mais aussi aux produits d'origine végétale facilement décomposables dont la vitesse de décomposition est souvent jugée comparable (CLARK et PAUL, 1970) (CHAUSSOT et al., 1986).

Si l'on ne tient pas compte de la différence d'échelle de temps apports/humification (suppression des parenthèses dans l'équation (11)) on peut comme JENKINSON et LADD, calculer l'apport correspondant au maintien des conditions d'état dynamique stable :

$$m = \alpha[A] (1 - P_a - P_b)/P_a$$

$$m = \beta[B](1 - P_a - P_b)/P_b$$

En fait, la présentation que nous donnons correspond également à une simplification du modèle de JENKINSON et RAYNER (1977) :

— Pour l'évolution à court terme, nous négligeons la fraction « Chemically stabilised organic matter », dans laquelle les entrées sont très faibles.

— Nous remplaçons les deux compartiments à cinétique du premier ordre « décomposable plant material » et « Resistant plant material » par un seul compartiment dont la cinétique peut être, selon l'état du sol, exponentielle ou hyperbolique.

Pendant un intervalle de temps δt l'évolution respective de chaque compartiment peut être assimilée à :

$v = \text{EXP}(-\Gamma \delta t)$ ou $v = 1/(1 + \text{Vo}\Gamma \delta t)$ pour le compartiment végétal selon sa décroissance sans E de EXP, décroissance exponentielle ou hyperbolique.

$a = \text{EXP}(-\alpha \delta t)$ pour le compartiment instable.

$b = \text{EXP}(-\beta \delta t)$ pour le compartiment stable.

Au temps $t_i = t_{i-1} + \delta t$, l'état du sol est décrit par le vecteur :

$$S_i = \begin{pmatrix} V \\ A \\ B \end{pmatrix}_i \quad \text{obtenu au moyen du produit matriciel :} \quad S_i = M S_{i-1} \quad (14)$$

où M représente la matrice d'évolution du sol :

$$M = \begin{pmatrix} v & 0 & 0 \\ P_a(1 - v) & a + P_a(1 - a) & P_a(1 - b) \\ P_b(1 - v) & P_b(1 - a) & b + P_b(1 - b) \end{pmatrix}$$

Là aussi, la méthode matricielle fournit des résultats comparables aux autres méthodes d'intégration numérique des équations de vitesses. Les courbes de la figure 4 représentent l'évolution simultanée de chaque compartiment et du carbone total pour les trois sols avec les plus forts apports de paille.

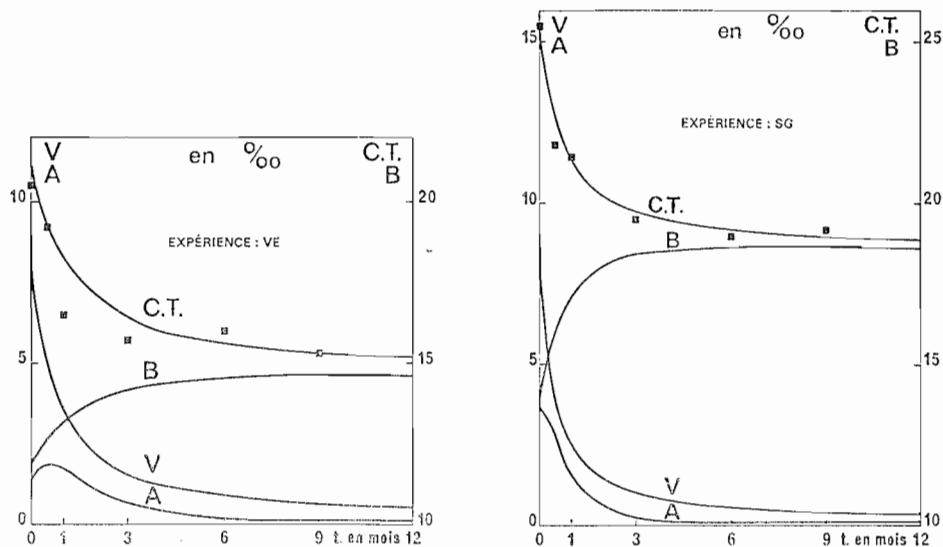


Figure 4 : Evolution simultanée des 3 compartiments du modèle III (figure 1) et du carbone total pour les apports de paille de blé correspondant à 8,1 pour mille de carbone des expériences VE et SG.

Simultaneous evolution of the three compartments of our model III (figure 1) and of total carbon for the supplies of 8,1 pour mille carbon wheat straw from the VE and SG experiments.

La validation du modèle est très satisfaisante pour l'expérience avec apport de gypse (SG). Les processus d'humification et de minéralisation sont alors plus rapides. Les mesures du carbone total des deux autres expériences s'ajustent un peu moins bien aux valeurs prédites.

On remarque une décroissance rapide du carbone végétal V accompagnée :

— d'une croissance plus lente du carbone stabilisé en B qui se rapproche du carbone total après six mois d'incubation.

— une croissance dans les premiers jours d'incubation (VE), voire dès le premier jour (SG), du carbone labile A d'origine microbienne et végétale. Ce carbone décroît ensuite rapidement et devient très peu abondant après 3 mois sans jamais atteindre une valeur négligeable.

On notera que le maximum de notre compartiment A se situe toujours à une durée d'incubation plus faible que le maximum observé (JENKINSON et LADD, 1981) pour la croissance de la biomasse en conditions naturelles. Cependant, pour l'expérience VE, il se situe au même endroit que celui noté par VAN VEEN et PAUL (1981) dans des conditions semblables.

CONCLUSIONS

Les deux modèles prévisionnels que nous proposons n'ont été validés que par des expériences de laboratoire dans des conditions contrôlées.

Le premier modèle (N° II figure 1) différencie seulement le carbone labile et le carbone stable du sol. Contrairement au modèle de HENIN et al. (1959), ce dernier ne comprend pas uniquement les fractions humifiées mais aussi une partie des fractions

végétales stabilisées dès leur incorporation. L'autre différence concerne un renouvellement du carbone labile depuis le carbone stable, même en l'absence d'apport végétal.

Le *second modèle* (N° III figure 1) est plus précis car il permet de tenir compte d'une répartition du carbone dans trois compartiments : fractions végétales non remaniées (V), microorganismes et métabolites végétaux labiles (A), matières organiques stables (B).

L'application des modèles à des études prévisionnelles au champ sur les sols de la région de MATEUR nécessitera la transposition sur le terrain des expériences de laboratoire avec des doses d'amendements organiques forcément plus limitées.

La possibilité de simuler avec nos modèles différents apports de pas de temps variables devrait aider à cette transposition.

Reçu pour publication : Mars 1987

Accepté pour publication : Septembre 1987

REMERCIEMENTS

Nous remercions Monsieur S. HENIN pour ses encouragements à valider et dépasser son modèle, Messieurs H. CHEVILLOTTE, J. TOUMA, B. LOUSTALAN, G. PICHON pour les discussions animées et amicales sur les méthodes numériques, Mesdames E. GAVINELLI, I. ROCHETTE, M. RICHARD, pour leur conseils en matière d'analyses chimiques et Monsieur P. de BOISSEZON qui a dirigé ce travail à l'ORSTOM.

SOIL HUMIFICATION AND MINERALIZATION KINETICS

A serie of three laboratory experiments concerning the incubation of mixtures of soils (vertisol and calcareous saline soils) and wheat straws allowed to equate as function of time total organic carbon contents and carbon contents of light plant materials separated by densimetry.

The evolution of organic carbon contents has been fitted to a sum of two exponentials (table III) whose parameters have been compared with the results obtained with other experiments (table IV).

The carbon contents in light plant materials decrease following an hyperbolic law in two experiments and following an exponential law in the third one (table VI, fig. 3).

Two models are suggested to describe the soil carbon and plant residues humification and mineralization processes by the microorganisms action (fig. 1) :

— *a two compartment model which takes better account of turnover processes than the model worked out by HENIN et al. (1959).*

— *a more accurate three compartment model which allows to distinguish in labile fractions, plant carbon from carbon resulting both from the microbial growth and short-lived plant metabolites.*

The suggested models have been confirmed by our laboratory experiments (table V, fig. 2, fig. 4).

BIBLIOGRAPHIE

- BALESDENT J., 1982. — Etude de la dynamique de l'humification de sols de prairies d'altitude (Haut-Jura) au moyen des datations C^{14} des matières organiques. Thèse Docteur-Ingénieur, Univ. Nancy I, 90 pages.
- BOIFFIN P. et FLEURY A., 1974. — Quelques conséquences agronomiques du retournement des prairies permanentes. *Ann. agron.*, 25 (4), p. 555-573.
- BOIFFIN J., KELI ZAGBAHI J. et SEBILLOTTE M., 1986. — Systèmes de culture et statut organique des sols dans le Noyonnais : application du modèle de Hénin-Dupuis. *Agronomie*, 6 (5), p. 437-446.
- CHEVILLOTTE H., TOUMA J., 1987. — Le logiciel OPTIM : Optimisation d'ajustements non linéaires, ORSTOM (à paraître)
- CHAUSSOD R., NICOLARDOT B., SOULAS G., JOHANNES H., 1986. — Mesure de la biomasse microbienne dans les sols cultivés. II. Cinétique de minéralisation de matière organique microbienne marquée au carbone 14. *Rev. Ecol. Biol. Sol*, 23 (2), 119-153.
- CLARK F.E. et PAUL E.A., 1970. — The microflora of glassland. *Advan. Agron.*, 22, 375-435.
- DABIN B., 1976. — Méthode d'extraction et de fractionnement des matières humiques du sol. Application à quelques études pédologiques et agronomiques dans les sols tropicaux. *Cahiers ORSTOM, série pédol.*, 14 (4), 287-297.
- GRAFFIN Ph., 1971. — Etude intégrée de la décomposition d'apports organiques dans le sol. *Ann. Agron.*, 22, 2, 213-239.
- HENIN S. et DUPUIS M., 1945. — Essai de bilan de la matière organique du sol. *Ann. Agron.*, 15, 17-29.
- HENIN S. et TURC L., 1949. — Essai de fractionnement des matières organiques du sol. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 35 (1), 41-43.
- HENIN S., MONNIER G. et TURC L., 1959. — Un aspect de la dynamique des matières organiques du sol. *C.R. Acad. Sci. Fr.*, 248, 138-141.
- HOFMAN G. et VAN RUYMBEKE M., 1979. — Evolution of soil humus content and calculation of global humification coefficients on different organic matter treatments during a 12-year experiment with belgian silt soils, *Soil Sci.*, 129 (2), 92-94.
- JENKINSON D.S., 1965. — Studies on the decomposition of plant material in soil. I. Losses of carbon from C^{14} labeled ryegrass incubated with soil in the field *Soil Sci.*, 16, (1), 105-115.
- JENKINSON D.S., 1977. — Study on the decomposition of plant material in soils. V. The effects of plant cover and soil type on the loss of carbon from ^{14}C labeled ryegrass decomposing under field conditions *J. Soil Sci.*, 28, 424-434.
- JENKINSON D.S. et AYABANA A., 1977. — Decomposition of carbon-14 labeled plant material under tropical conditions. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, 41, 912-915.
- JENKINSON D.S. et RAYNER J.H., 1977. — The turnover of soil organic matter in some of the rothamsted classical experiments. *Soil Sci.*, 123, (5), 298-303.
- JENKINSON D.S. et LADD J.N., 1981. — Microbial biomass in soil measurement and turnover in « *Soil Biochemistry* », Marcel Dekker, New-York, 5, 415-471.
- JUMA N.G. et MCGILL W.B., 1986. — « Microfloral and faunal interactions in natural and agro-ecosystems ». M.J. MITCHELL et J.P. NAKAS Ed., Martinus Nijhoff Publishers, 74-136.
- LADD J.N. et Coll., 1981. — Microbial biomass formed from C^{14} , N^{15} labeled plant material decomposing in soils in the field, *Soil Biol. Biochem.*, 13, 119-126.
- LYNCH J.M., 1979. — Straw residues as substrates for growth and product formation by soil micro-organisms, *J. Wiley et Sons*, New-York, 47-56.
- MARQUARDT D.W., 1963. — An algorithm for least squares estimation of non linear parameters. *Journal of the society of industrial and applied mathematics*, 11 (2), 431-441.
- MONNIER G., TURC L., JEANSON-LUUSINANG G., 1962. — Une méthode de fractionnement densimétrique par centrifugation des matières organiques du sol. *Ann. Agron.*, 13 (1), 55-63.

- NYHAN J.W., 1975. — Decomposition of carbon-14 labeled plant materials in a glassland soil under field conditions. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 39, 643-648.
- PANSU M., 1983. — SPCLAS, un logiciel basic pour le calcul, le classement et la gestion des résultats d'un laboratoire d'analyses physico-chimiques, ORSTOM Bondy, 60 p.
- PAUL E.A. et VAN VEEN J.A., 1978. — The use of tracers to determine the dynamic nature of organic matter. *Trans. 11th Int. Congr. Soil Sci.*, Edmonton, Alta, 3, 61-102.
- SAUERBECK D. et GONZALEZ M.A., 1977. — Field decomposition of C14 labeled plant residues in various soils of the federal republic of Germany and Costa Rica. In *Soil organic matter studies, Proc. Symp. FAO/EIEA*, Sept. 1976, Braunschweig, Germany, 1, 159-170.
- SIDI H., 1987. — Effet de l'apport de matière organique et de gypse sur la stabilité structurale de sols de région méditerranéenne (Mateur - Tunisie). Thèse Doct. Ing. INAPG Paris, 206 p.
- STEVENSON F.J., 1986. — Cycles of soil : carbon, nitrogen, sulfur, micronutrients. J. Wiley et Sons Ed., New-York, 1-44.
- VAN VEEN J.A. et PAUL E.A., 1981. — Organic carbon dynamic in glassland soils. 1. Background information and computer simulation. *Can. J. Soil Sci.* 61, 185-201.
- VORONEY R.P., 1983. — Decomposition of plant residues. Ph. D. Thesis. University of Saskatchewan, Saskatoon.

